

Couplage Ecoulement-Structure pour simuler la stabilité des digues en enrochement

K. Sami^a, A. Ouahsine^a, M. Rouainia^b, F. Hissel^c

^a. Université de Technologie de Compiègne (UTC), Centre de Recherches de Royallieu, laboratoire Roberval UMR CNRS 6253, 60205 COMPIEGNE (France)

^b. School of Civil Engineering and Géosciences, University of Newcastle, NE1 7RU, NEWCASTEL (UK)

^c. Centre d'études techniques maritimes et fluviales (CETMEF), 2 Boulevard Gambetta, 60321 COMPIEGNE (France)

Résumé :

Un couplage fluide-structure est proposé pour étudier la stabilité des digues en enrochements sous les effets hydrodynamiques de la houle et des courants. Un code en éléments finis de Navier-Stokes pour le calcul fluide est alors couplé à un autre code pour le calcul solide basé sur la méthode de l'analyse de déformations discontinues (DDA). Le but est de simuler les actions hydrodynamiques sur une digue, en tenant compte de la nature des contacts entre blocs constituant la digue et de leur forme afin d'améliorer la stabilité de la digue.

Abstract:

A fluid-structure interaction is proposed to study the stability of dams in rocks under the effects of hydrodynamic waves and current. A CFD code based on the finite element method is then coupled to another code of solid calculation based on the method of discontinuous deformation analysis (DDA). The aim for this work is to simulate the hydrodynamic actions on the dams, taking into account the nature of contact between the dam block constituents and their form in order to increase the lifespan of the dam.

Mots clefs: Couplage fluide-structure, éléments discrets (DEM), méthode DDA, digues, enrochements, contact, simulation numérique.

1 Introduction

Une des problématiques actuelles pour la gestion des zones consiste à surveiller les structures en enrochements destinées à protéger les rivages des effets dévastateurs de la houle et des courants. Ces ouvrages (digues à talus ou verticales) constitués de blocs naturels ou usinés selon une géométrie bien définie qui viennent se poser sur un noyau fait de tout-venant ou bien de sable, sont soumis à des sollicitations hydrodynamiques intenses et répétées, à une fréquence de l'ordre du demi hertz, pendant toute la durée de leur vie.

À l'heure actuelle, des modèles macroscopiques basés sur des lois empiriques (loi de Hudson, loi de Van der Meer [6]), ont été développés pour décrire les conditions de stabilité des digues en enrochements sous l'action de la houle. Ces modèles s'avèrent néanmoins incapables de fournir une description précise des phénomènes dynamiques qui rentrent en jeu. Les modèles d'éléments discrets sont en revanche particulièrement prometteurs de ce point de vue puisqu'ils permettent une analyse fine à l'échelle de l'enrochement de la stabilité des digues et des processus de rupture. Cependant, pour représenter fidèlement la réalité, ils doivent nécessairement tenir compte de la nature du forçage hydrodynamique et des écoulements et être couplés avec des modèles de dynamique des fluides.

Dans le présent travail on se propose d'étudier la stabilité des ces structures en enrochement sous sollicitations hydrodynamiques, en tenant compte de la nature du contact entre blocs et de leurs forme et en tenant compte également de la constitution de la structure : la carapace est supposée constituée de blocs solides de différentes forme et le noyau est constitué d'un matériau tout-venant supposé poreux (figure 1).

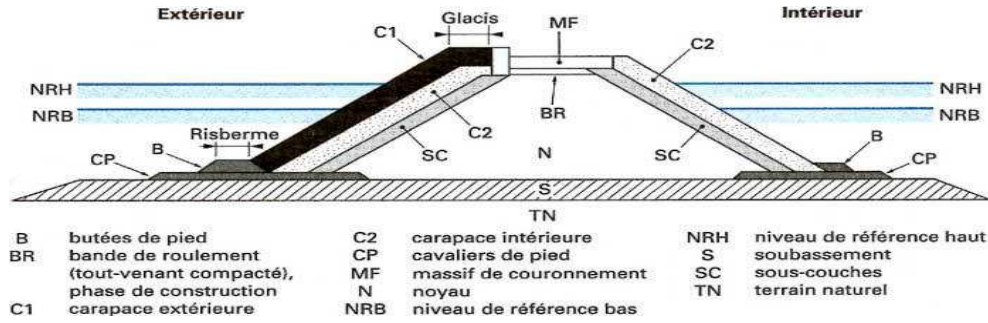


FIG. 1 – Présentation schématique de différents constituants d'une digue.

2 Formulation mathématique et équations à résoudre

2.1 Milieu Fluide

On considère le mouvement d'un fluide, visqueux et incompressible, dans un repère cartésien Oxz . En notant Ω le domaine fluide, les équations de mouvements de ce fluide vérifient le système suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} - \tau_{ij} - F_i = 0 & \text{sur } \Omega \quad i, j = 1, 2 \\ \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = 0 & \text{sur } \Omega \quad i, j = 1, 2 \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + u_i \frac{\partial \eta}{\partial x_j} = 0 & \text{sur } \Gamma_\eta \quad i, j = 1, 2 \end{cases} \quad (1)$$

La première équation désigne l'équation de quantité de mouvement, la seconde désigne l'équation de continuité, et la troisième désigne l'équation de l'élévation de la surface libre. $v_i = (U, W)$ est la vitesse suivant la direction i , P est la pression dynamique, η est la dénivellation de la surface libre imposée à la frontière Γ_η , F_i composantes des forces extérieures et τ_{ij} les composantes du tenseur des contraintes visqueuses.

2.1.1 Conditions aux limites et initiales

A ce système d'équations (1) sont associées des conditions aux limites suivantes :

- $U = 1 \text{ m/s}$: à l'entrée du domaine (entrée amont gauche)
- $U = W = 0$ au niveau des frontières solides (au fond $z = 0$)
- $p = p_0 = 1 \text{ bar}$, au niveau de la surface libre, en contact avec l'atmosphère.

2.2 Milieu poreux

Le noyau de la structure est supposé constituée d'un matériau dit tout-venant. Ainsi, afin de modéliser la filtration du fluide à travers ce milieu poreux, un couplage entre les milieux fluide et poreux est alors effectué. Cela permettra d'estimer la vitesse moyenne du fluide entre la carapace et le noyau de la digue. Cependant, les vitesses générées dans de tels milieux sont instationnaires et sont relativement rapides. Dans ce cas le calcul dans le milieu poreux est régi par la loi Darcy-Forchheimer suivante :

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\mu}{k} V + \beta \rho V^2 \quad (3)$$

Où ρ représente la masse volumique et β est un coefficient lié à la géométrie du milieu, μ La viscosité dynamique du fluide, p la pression hydrostatique, k la perméabilité intrinsèque du milieu poreux.

2.3 Milieu Solide

2.3.1 Analyse par Déformation Discontinue (DDA)

Récemment, une approche intitulée Analyse par Déformations Discontinues (DDA) pour la modélisation continue et discontinue des solides a été proposée par SHI (1988) [1]. Cette approche basée sur la méthode des éléments discrets (DEM), fait intervenir la détection du contact entre blocs en fonction de la déformation et permet de décrire la transition d'un milieu continu à un milieu discontinu en fonction de la fissuration et fragmentation des blocs.

2.3.2 Formulation mathématique

La méthode DDA est basée sur un système d'éléments discontinus, où les déplacements de chaque bloc sont les inconnues que l'on obtient par la résolution des équations d'équilibre. Ces équations sont formulées en minimisant l'énergie potentielle totale du système, suivante :

$$\Pi_i = f^T d_B + \frac{1}{2} \int \varepsilon^T \sigma dA. \quad (4)$$

Où f^T est le vecteur force incluant les forces de contact, d_B le déplacement, ε la déformation, et σ la contrainte. La minimisation de cette énergie pour un bloc i nous conduit à 6 équations :

$$\frac{\partial \Pi_i}{\partial d_i}, \quad \text{où } i = 1-6 \quad (5)$$

En arrangeant les équations obtenues par variable on aboutit à un système diagonal.

$$K_{ii} D_i = F_i \quad (6)$$

Où d_i est le vecteur de variables d'un seul bloc, il contient les translations et la rotation d'un bloc autour de son centre de gravité u_0, v_0 et y_0 , et les déformations linéaires $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ et ε_{xy} respectivement :

$$d_i^T = \{u_0, v_0, y_0, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}\} \quad (7)$$

Dans le cas bidimensionnel, le déplacement (u, v) de chaque point (x, y) de bloc i , est donné par :

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -(y - y_0) & (x - x_0) & 0 & (y - y_0) \\ 0 & 1 & -(x - x_0) & 0 & (y - y_0) & (x - x_0) \end{pmatrix} \{d_i\} = (T_i) \{d_i\} \quad (8)$$

2.3.3 Contact entre blocs

Parmi les avantages de la formulation DDA est que, outre l'équilibre dynamique qui doit être assuré à chaque pas de temps Δt , la pénétration entre blocs ainsi que la traction sur les surfaces ne sont pas autorisés (1995) [2]. Dans les présentes applications, ces contraintes sont assurées en modélisant le contact entre blocs en utilisant la méthode de Lagrange augmenté suivante :

$$\Pi_s = \lambda_k^* d + \frac{1}{2} p \cdot d^2 \quad (9)$$

Π_s représente l'énergie potentielle liée à la force de contact entre blocs, d la distance de pénétration, p la pénalité, λ_k^* la force de contact inconnue causée par la pénétration entre blocs.

La prise en compte du contact entre blocs a conduit à un autre système donné par (10) :

$$K_K D_K = F_K \quad (10)$$

Ensuite, en minimisant l'équation (9) et en assemblant les systèmes (6) et (10) on obtient le système (11) :

$$\begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \dots \\ d_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_n \end{pmatrix} \quad (11)$$

Où f_i est le vecteur des forces extérieures appliquées sur le bloc i , ce vecteur contient aussi les forces de contact, d_i vecteur de variable qu'on cherche associe au bloc i , les termes de diagonale ($k_{ii}, i = j$) correspondent à la rigidité du matériau de bloc, les termes hors diagonales ($k_{ij}, i \neq j$) représentent la rigidité associé au contact entre le bloc i et le bloc j .

3 Couplage

Le couplage entre les différents modules est effectué à chaque itération où la pression obtenue du module numérique fluide sera ajoutée à une pression hydrostatique obtenue par la résolution de l'équation de Darcy dans le milieu poreux. Ensuite, la pression totale obtenue est utilisée comme sollicitation externe pour le module numérique solide, qui fournira les champs de déplacement des blocs de la digue. Après cette procédure, le remaillage de domaine de fluide est nécessaire pour la mise à jour de la géométrie des blocs. Un des avantages de cette procédure de couplage instantané est l'optimisation du temps de calcul et de mémoire, contrairement au couplage fort, qui nécessite une grande capacité de stockage pour les matrices masse et rigidité. Elle permet aussi de modifier séparément les codes fluides ou structure afin d'envisager des lois de comportement différentes.

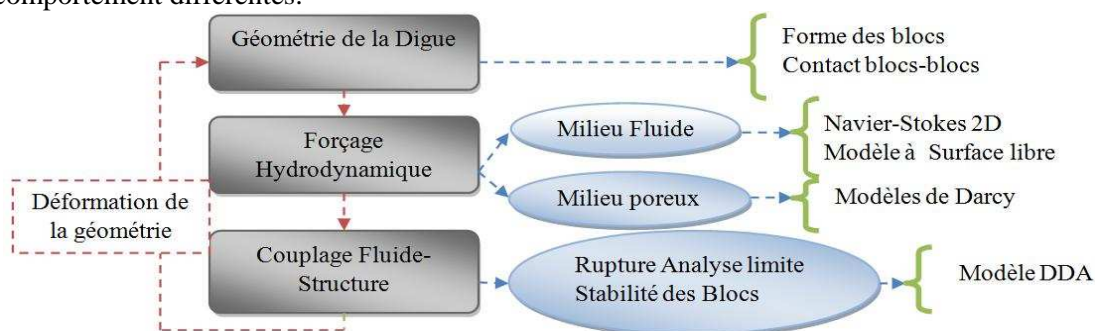


FIG. 2 – Organigramme du couplage entre les trois modèles.

4 Validation et résultats

La validation du modèle fluide est effectuée en considérant l'écoulement d'un fluide incompressible dans un canal où l'on place des obstacles sous forme de blocs (figure 3). Pour la partie fluide, nous avons utilisé des éléments triangulaires T6 (P2-P1), et la discrétisation du système global non linéaire, mixte en (u,p) est résolu à l'aide de la méthode itérative de Newton Raphson.

Le résultat obtenu est confronté aux résultats issus d'un logiciel commercial TDYN. La comparaison quantitative visuelle montrer une certaine concordance entre les solutions obtenues des vitesses.

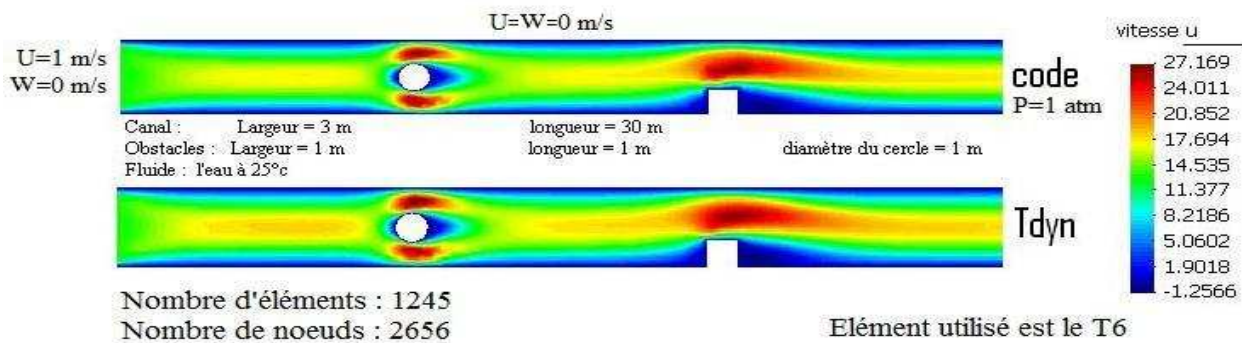


FIG. 3 – Écoulement dans un canal avec deux obstacles.

4.1 Applications

4.1.1 Cas test 1

L'objectif de ce test est de valider le couplage entre les modules fluides, poreux et structure et de vérifier la capacité de la formulation DDA à traiter des problèmes de la dynamique de corps rigides. La figure (figure 4) illustre le mouvement d'un bloc, en forme de polygone, soumise au seul effet de l'inertie sur un plan incliné de pente $\alpha = 30.25^\circ$ et de longueur $L=13.89$ m. Les propriétés physiques du matériau sont celles du béton, et chaque pas de calcul correspond à 0.00125 secondes.

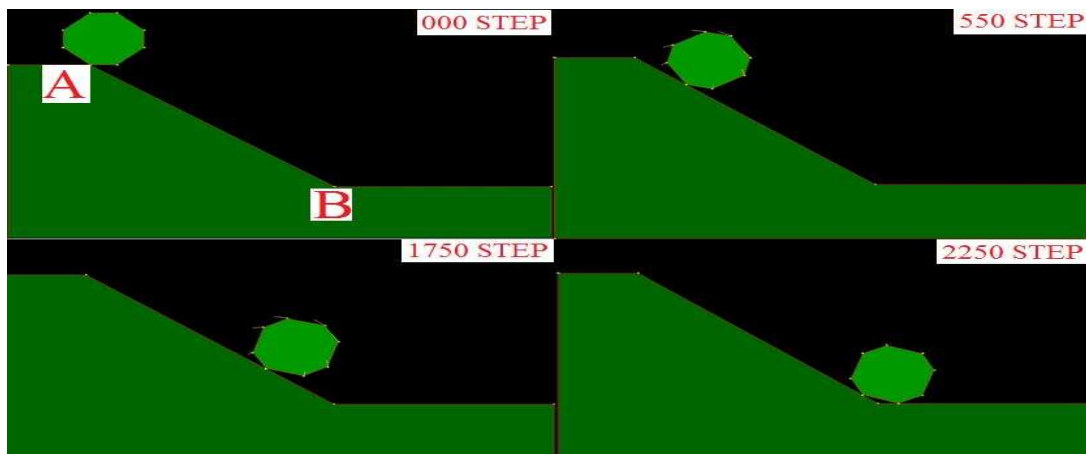


FIG. 4 – Déplacement simulé d'un bloc sur un plan incliné sous l'effet de l'inertie $\alpha = 30.25^\circ$ et de longueur $L=13.89$ m.

4.1.2 Cas test 2

Ce deuxième cas test concerne la simulation de la stabilité d'une digue constituée par 12 blocs, en appliquant une force hydrodynamique due de la houle. La stabilité de la digue est mise en œuvre en imposant au bloc A un léger mouvement, qui déstabilise la digue en bougeant les autres blocs B et C (figure 5). Chaque pas de calcul correspond à 0.00125 secondes.

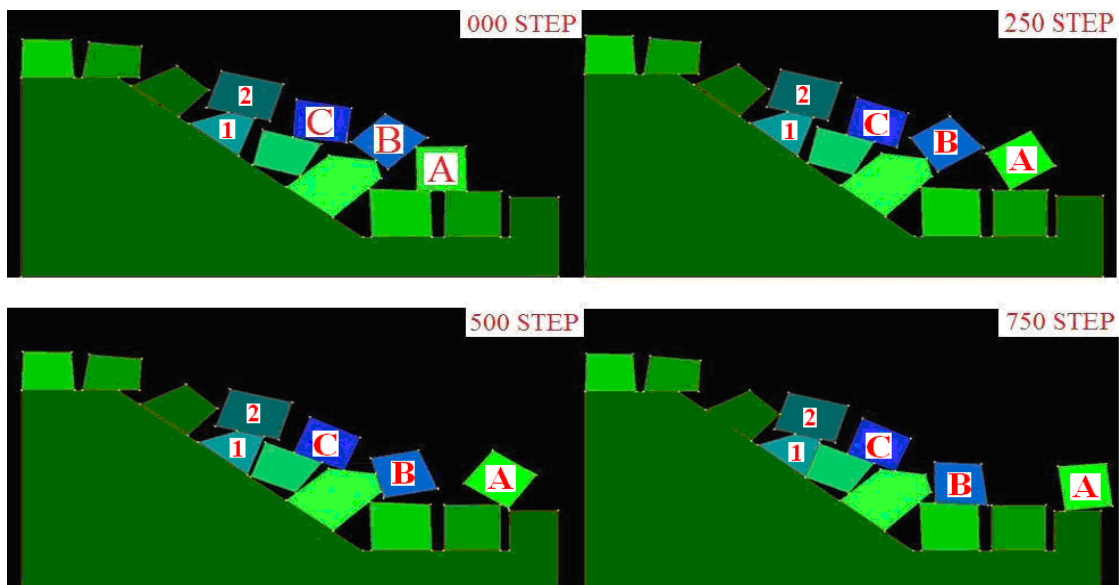


FIG. 5 – Rupture d'une digue, formée de 12 blocs.

En analysant les mouvements des blocs identifiés par les lettres B et C ou les chiffres 1 et 2 (figure 5), on s'aperçoit que les blocs subissent des mouvements relativement brusques et rapides pendant un certain temps, puis après un certain temps ils atteignent un état statique qui correspond à un état de stabilisation de leur mouvement (figure 6).

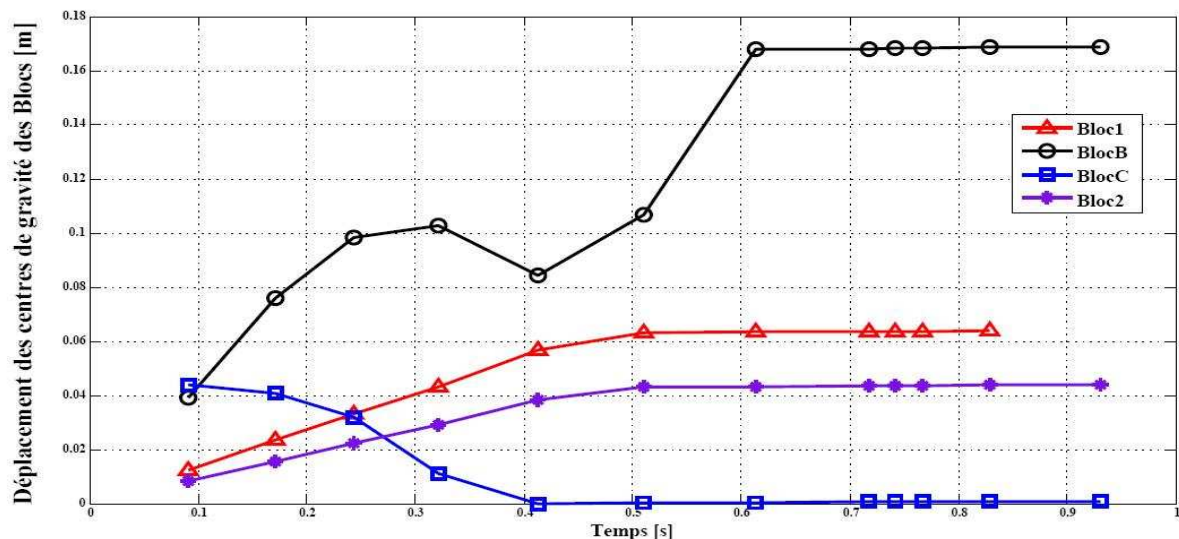


FIG. 6 – Déplacement des centres de gravité des blocs (1, 2, B, C).

5 Conclusion

Un couplage entre trois modèles numérique (fluide, poreux et solide) est mise en oeuvre pour étudier la stabilité des digues en enrochement. Il s'agit d'un couplage fluide structure où la structure est formée d'éléments discrets (blocs) susceptibles de se déformer. En utilisant la méthode DDA, comme alternatif aux méthodes d'éléments finis classiques, nous avons pu introduire le contact entre les blocs et gérer les interactions blocs-fluide et blocs-blocs en optimisant le temps de calcul et la taille de mémoire de stockage.

Références

- [1] Shi, G.H., Discontinuous deformation analysis, a new numerical model for statics and dynamics of block systems, PhD Thesis, 1988.
- [2] Chihsen T., Extensions to the discontinuous deformation analysis for jointed rock masses and other blocky systems.
- [3] Rouainia M., Pearce C. and Bicanic N. HYDRO-DDA modelling of fractured mudrock seals, in: N.Bicanic (eds.) Proc. Int. Conf. on Analysis of Discontinuous Deformation: ICADD-4, Glasgow, Scotland, U.K, 6-8 June 2001.
- [4] Dhatt G., Touzot G., une présentation de la méthode des éléments finis, 1984.
- [5] Ke, T. C. and Bray, J. D. (1995). "Modeling of particulate media using discontinuous deformation analysis", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 121, No. 11, pp. 1234-1243.
- [6] Caminade D., Ouvrages de protection contre la houle, Réf C 4631, Technique de l'Ingénieur, 1995.